



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**REŠERŠNÍ STUDIE ZUBNÍCH IMPLANTÁTŮ  
ZAVÁDĚNÝCH DO HORNÍ ČELISTI**

BIOMECHANICAL RESEARCH STUDY OF MAXILLARY DENTAL IMPLANTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jana Navrátilová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Marcián, Ph.D.**

**BRNO 2016**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Studentka: **Jana Navrátilová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Marcián, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Rešeršní studie zubních implantátů zaváděných do horní čelisti

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dentální implantáty aplikované do kostní tkáně horní nebo dolní čelisti slouží jako umělé náhrady kořenů zubů. Na ně jsou upevněny korunky případně můstky. Implantace do horní čelisti je více náročná jak na kvalitu kostní tkáně, tak i na množství prostoru, který horní čelist poskytuje.

### Cíle bakalářské práce:

1. Provedení rešerše dostupné literatury z oblasti řešeného problému.
2. Provést deformačně napěťovou analýzu soustavy horní čelisti s implantátem.

### Seznam literatury:

Misch C. E. (2007): Contemporary Implant Dentistry. Mosby, Hardbound.

Wolff, J., Narra, N., Antalainen, A., Valášek, J., Kaiser, J., Sándor, G. a Marcián, P. (2014): Finite element analysis of bone loss around failing implants. Materials and design, roč. 61, č. 22, s. 177-184.  
DOI: 10.1016/j.matdes.2014.04.080

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena řešeršní studii zubních implantátů v horní čelisti. Horní čelist je specifická kvalitou kostní tkáně a množstvím prostoru, který poskytuje pro implantaci. Práce uvádí možné problémy při implantaci do horní čelisti a popisuje možnosti augmentačních postupů. V další části práce byla provedena deformačně-napěťová analýza soustavy horní čelist a implantát pomocí výpočtového modelování. K řešení byla použita metoda konečných prvků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

dentální implantát, horní čelist, deformačně-napěťová analýza, metoda konečných prvků

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with a literature search on theme dental implants in maxilla. Maxilla is a specific area because of its bone tissue quality and the amount of space for applying implant. The thesis presents possible complications during implation in maxilla and augmentation opportunities. Further stress-strain analysis of maxilla with dental implant was made. For solving the problem the computational modeling by using Finite Element Method was used.

## **KEYWORDS**

dental implants, maxilla, stress-strain analysis, finite element methods

NAVRÁTILOVÁ, J. *REŠERŠNÍ STUDIE ZUBNÍCH IMPLANTÁTŮ ZAVÁDĚNÝCH DO HORNÍ ČELISTI*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 44 s. Vedoucí práce Ing. Petr Marcián, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Rešeršní studie zubních implantátů zaváděných do horní čelisti* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, jenž je součástí této práce.

27. 5. 2016

Jana Navrátilová

Děkuji panu Ing.Petru Marciánovi,Ph.D. za rady, věnovaný čas a odborné vedení při tvorbě této bakalářské práce.

Jana Navrátilová

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Popis problémové situace</b>	<b>9</b>
2.1	Cíle řešení . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Rešerše dostupné literatury</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Anatomie ústní dutiny, zubu, čelisti</b>	<b>11</b>
4.1	Zuby . . . . .	11
4.2	Kost . . . . .	11
4.2.1	Kostní tkáň . . . . .	12
4.2.2	Hustota kosti – densita . . . . .	12
4.2.3	Kvantita kosti . . . . .	14
4.3	Horní čelist – Maxilla . . . . .	15
4.4	Dolní čelist – Mandibula . . . . .	17
4.5	Síly působící při skusu . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Druhy implantátů</b>	<b>18</b>
5.1	Válcové implantáty . . . . .	18
5.2	Čepelkové implantáty . . . . .	19
5.3	Další varianty implantátů . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Postup implantace</b>	<b>21</b>
6.1	Objasnění pojmu oseointegrace . . . . .	21
6.2	Chirurgická fáze implantace . . . . .	22
6.2.1	První fáze implantace . . . . .	22
6.2.2	Druhá fáze implantace . . . . .	22
6.3	Protetická fáze . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Problémy s implantací do horní čelisti</b>	<b>24</b>
7.1	Implantace v zadní části maxilly . . . . .	24
7.2	Implantace v přední části maxilly . . . . .	25
7.3	Augmentace . . . . .	26
7.3.1	Varianty augmentačních postupů . . . . .	26
7.3.2	Augmentační materiály . . . . .	27
<b>8</b>	<b>Výpočtové modelování</b>	<b>28</b>
8.1	Model geometrie . . . . .	28

8.2	Model materiálu . . . . .	31
8.3	Model vazeb . . . . .	31
8.4	Model zatížení . . . . .	32
<b>9</b>	<b>Prezentace a analýza výsledků</b>	<b>33</b>
9.1	Analýza napětí v implantátu . . . . .	33
9.2	Analýza výsledného přetvoření v kosti . . . . .	35
9.3	Analýza deformace . . . . .	37
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>40</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>44</b>

# 1 ÚVOD

Zdravý zubní chrup je pro člověka důležitým nástrojem, bez něhož by byl jeho život neplnohodnotný, nebo přinejmenším příliš komplikovaný. Plní několik rozdílných funkcí. Zajišťuje rozměňování potravy, umožňuje správnou výslovnost a je součástí celkového vzhledu člověka.

O zuby, tak jako o zbytek těla, je potřeba pečovat a věnovat jim náležitou pozornost. I přesto se však může stát, že se vyskytnou problémy vedoucí až ke ztrátě jednoho nebo více zubů. Důvodem může být nedostatečná hygiena, špatná životospráva, úraz, genetická predispozice nebo pokročilý věk.

Historie nahrazování zubů je dlouhá a postupně se vyvíjela až do dnešní podoby. Důležitým mezníkem je dvacáté století a švédský doktor Bränemark, který prvně pozoroval jev oseointegrace – vhojení implantátu přímo do kosti. Lékařský obor stomatologie se v dnešní době zabývá prevencí, diagnostikou, léčením a výzkumem onemocnění chrupu a tkání dutiny ústní. Dentální implantologie se pak soustřeďuje na případy ošetření částečně nebo zcela bezzubých pacientů. Součástí je zavedení implantátu do kostní tkáně a následné upevnění fixní nebo snímatelné náhrady.

Implantologie se v současné době stala běžnou lékařskou praxí a dosahuje vysoké úspěšnosti. Přesto však léčba nesmí být podceněna. Důležitý je výběr vhodného druhu implantátu, odbornost a zkušenosti ošetřujícího lékaře, a v neposlední řadě stav a přístup pacienta.



Obr. 1.1: Dentální implantát v horní čelisti[25]



## 2 POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Dentální implantáty, na něž jsou upevňovány korunky nebo můstky, jsou zaváděny do horní a dolní čelisti. Ve srovnání s dolní čelistí, je s implantací do horní čelisti spojeno více problémů a bývá méně úspěšná. A to především z důvodu kvality kostní tkáně a množství prostoru, který horní čelist poskytuje.

Pro úspěšnou implantaci je důležitá adaptace implantátu v lidském těle. Z hlediska biologického je nezbytné vhojení implantátu do kosti, tedy oseointegrace. Při následném zatěžování korunky žvýkáním je implantát mechanicky namáhán. Správná funkčnost implantátu je tedy problémem i biomechanickým.

Pro popis mechanického namáhání soustavy horní čelist – implantát je vhodné využít výpočtového modelování. Proto je nutné provést podrobnou rešeršní studii, která poskytne dostatečné množství podstatných vstupních informací souvisejících s výpočtovým modelováním. Poté se přistoupí k vytváření výpočtového modelu, vlastního řešení a následné analýze výsledků.

### 2.1 Cíle řešení

Cílem řešení práce je:

1. Rešerše dostupné literatury zaměřené na zubní implantáty zaváděny do horní čelisti
2. Deformačně napěťová analýza soustavy horní čelisti s implantátem

### 3 REŠERŠE DOSTUPNÉ LITERATURY

Pro řešení zadaného problému bylo potřeba provést rešerši dostupné literatury. Publikací vztahujících se k tématu biomechaniky dentálních implantátů je mnoho. Pro tuto práci byly stěžejní publikace zaměřující se na anatomii - především horní čelisti, dentální implantologii a publikace řešící deformačně napěťový stav v soustavě implantát – kost.

Publikace řešící anatomii zubu a horní čelisti:

- Anatomie. 2., upr. a dopl. vyd. [11]
- Klinická anatomie ve stomatologii. [20]
- Zubní lékařství: propedeutika.[19]

Publikace o dentálních implantátech:

- Contemporary implant dentistry. [1]
- Dentální implantologie.[2]
- Praktická implantologie. [3]
- Dental Implant Prosthetics.[5]
- Tissue integrated prostheses: osseointegration in clinical dentistry. [13]
- Biology of implant osseointegration. [7]
- Altered nasal airflow: an unusual complication following implant surgery in the anterior maxilla. [16]

Publikace o dentálních implantátech s důrazem na densitu kosti:

- Biomechanická studie zubních implantátů pro sníženou densitu kostní tkáně. [8]
- Density of the alveolar and basal bones of the maxilla and the mandible. [12]

Publikace zaměřující se na výpočtové řešení a deformačně napěťovou analýzu:

Z těchto zdrojů byly také určeny potřebné informace k tvorbě výpočtového modelu a jeho dílčích modelů - geometrie, zatížení, materiálu.

- Dental biomechanics. [6]
- Finite element analysis of bone loss around failing implants. [4]
- Finite element analysis of the dental implant using a topology optimization method. [14]
- Effect of abutment angulation on the strain on the bone around an implant in the anterior maxilla: A finite element study. [17]
- Silové účinky mezi zuby při skusu [18]

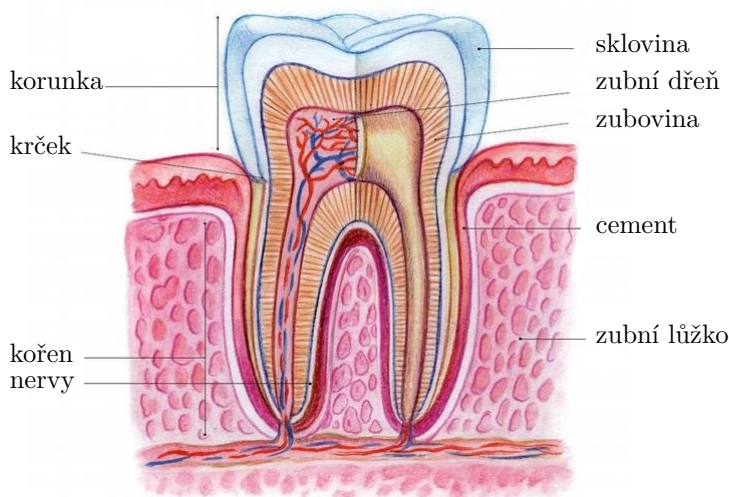
## 4 ANATOMIE ÚSTNÍ DUTINY, ZUBU, ČELISTI

### 4.1 Zuby

Hlavními částmi kostry obličeje je horní a dolní čelist (maxilla a mandibula), čelistní klouby, lícní kosti; důležité jsou žvýkácí svaly, patrové mandle, jazyk, hltan a slinné žlázy. Zuby jsou umístěny v ústní dutině, upevněny v kostěných zubních lužkách. Jsou řazené do zubních oblouků. Zuby jsou uzpůsobeny drcení a rozměňování potravy. Základní části zubu jsou: (obr. 4.1)

- zubní korunka – Dle tvaru zubní korunky rozlišujeme řezáky, špičáky, třenové zuby (premoláry) a stoličky (moláry).
- krček zubu – Oblast obklopená dásní.
- kořen zubu – Uložen v zubním lužku, prochází ním nervy a cévy. Spojení se stěnou alveolu zajišťují vazivová vlákna.

Tvrdými zubními tkáněmi jsou sklovina a zubovina. Sklovina kryje korunku zubu. Zubovina (dentin) vytváří hlavní hmotu zubu, určuje tvar zubu a je tvrdší než kost. V oblasti kořene a krčku pokrývá zub zubní cement. Zubní dřen vyplňuje dutinu korunky kořenový kanálek. [20]



Obr. 4.1: Anatomie zubu [30]

### 4.2 Kost

Kosti tvoří oporu celého těla, upínají se na ni svaly a šlachy. Vznikají z vaziva nebo chrupavky procesem nazvaným kostnatění (osifikace). Stavební částí každé kosti je

na povrchu vazivová okostice (periosteum), kostní tkáň (4.2.1) a uvnitř kostních dutin se nachází kostní dřev.

### 4.2.1 Kostní tkáň

Kostní tkáň je typ pojiva podílející se na stavbě kosti. Kostní tkáň je složena z devadesáti procent základními kostními buňkami (osteocyty), dále osteoblasty produkující základní kostní hmotu a osteoklasty (buňky odbourávající kostní tkáň). Buněčná tkáň má formu lamel, dle jejich vzájemného uspořádání rozdělujeme tkáň kortikální a spongiózní, obr.4.2. [11]

- Kortikální tkáň – V kortikální tkáni jsou kostní lamely uspořádány plošně, leží na sobě velmi těsně.
- Spongiózní tkáň – Pro spongiózní tkáň je typická tzv. houbovitá, pórovitá struktura a trámčité uspořádání kostních lamel.

Kostní tkáň spongiózní i kortikální mají schopnost remodelace, reagují tím na mechanické namáhání např. po zavedení implantátu nebo po ztrátě zubu. [1]



Obr. 4.2: Rozdělení kostní tkáně [4]

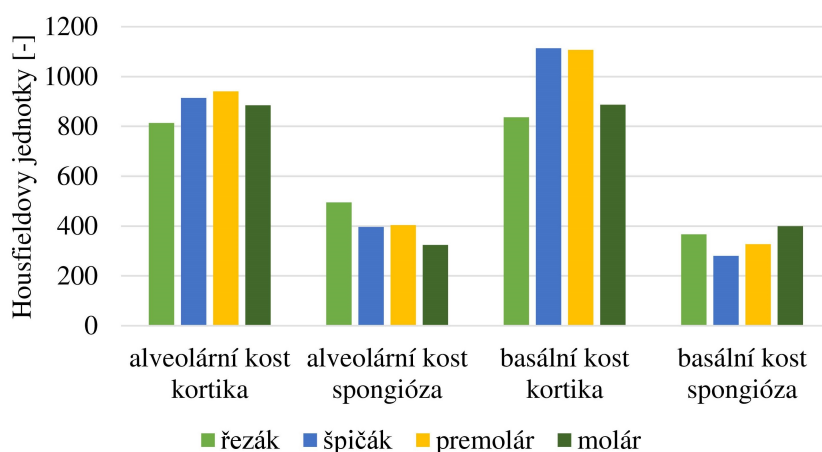
### 4.2.2 Hustota kosti – densita

Základním parametrem určující kvalitu kosti je její hustota (densita). Při dentální CT analýze lze z jejich snímků posoudit hustotu kosti. Kvantitativní analýza hustoty kostních tkání z CT snímků se provádí pomocí tzv. Hounsfieldových jednotek HU<sup>1</sup> [12].

---

<sup>1</sup>HU – Hounsfieldovy jednotky (Hounsfield units). Jsou používány při analýze hustoty kostních tkání z CT snímků. CT-čísla jsou lineárně závislá na hustotě dané tkáně, každému CT číslu je přiřazena jednotka HU a to pomocí transformačního vztahu. Jednotky mají pojmenování po inženýru Hounsfieldovi, který přišel na základní myšlenku počítačové tomografie. [9]

K prokázání závislosti kvality kosti na stabilitě implantátu, byla provedena Parkem a kol. měření hustoty kostní tkáně v maxille a mandibule. Závěrem studie je skutečnost, že v dolní čelisti jsou vyšší hodnoty hustoty kosti oproti horní čelisti. Měření hustoty kostní tkáně byla provedena v oblastech řezáku, špičáku, premoláru a moláru. Výsledky pro horní čelist (4.3) také ukazují, že alveolární hřeben má vyšší hustotu spongiózní kosti než basální úsek.[12]



Obr. 4.3: Srovnání hustoty kosti mezi alveolární a basální části horní čelisti, měřeno v HU [12]

Při implantaci do kvalitní kosti je vyšší pravděpodobnost úspěšné oseointegrace a dlouhodobé stability implantátu. Densitu kosti je vhodné rozdělit do několika tříd. Klasifikaci density (obr.4.4) provedl na základě Lekholma a Zarba (1985) Misch [1, 2]:

- D1 – Převažuje kortikální kost. Největší riziko primárního selhání. Pokud se implantát vhojí, lze jej nejvíce zatížit suprakonstrukcí.
- D2 – Hustá spongiózní kost se silnou vrstvou kortikální kosti, pro implantaci je nejideálnější.
- D3 – Snížená nosnost implantátu, tenká vrstva kortikální kosti. Při implantaci se doporučuje postupné zatížení implantátu.
- D4 – Tenká vrstva kortikální kosti s nekvalitní spongiózou.

Jednotlivým třídám density odpovídají i charakteristické hodnoty Hounsfieldových jednotek. Tuto klasifikaci kvality kosti provedl Misch a další (tab.4.1).

Výskyt různé density zobrazuje obr.4.5. Nejčastější výskyt kvality kosti D3 je ve frontální a postranní části horní čelisti, D4 v postranní části maxilly. Densitu D2 lze nalézt ve frontální oblasti horní čelisti. [1, 5]



Obr. 4.4: Klasifikace density kosti (Misch)[22]

Hustota	Misch	Norton a Gamble	Rubelisa
D1	1250	> 850	> 400
D2	850 do 1250	500 do 850	200 do 400
D3	350 do 850	500 do 850	200 do 400
D4	150 do 350	0 do 500	< 200
D5	< 150	-	-

Tab. 4.1: Rozdělení kvality spongiózní tkáně podle Hounsfieldových jednotek [9]

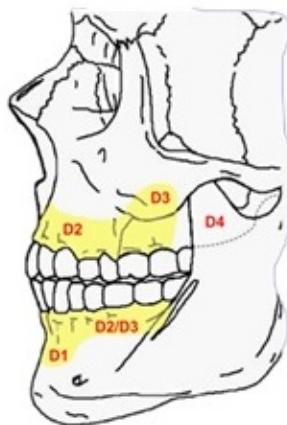
### 4.2.3 Kvantita kosti

Tvar kostí se v průběhu lidského života formuje a mění. Dochází k tzv. modelaci (novotvorba) a remodelaci (resorpce/úbytek) kosti. Při dlouhodobé ztrátě zubu není kost v daném místě zatěžována a tím atrofuje (dochází k úbytku). Také s přibývajícím věkem klesá množství kostní hmoty, nevytváří se kostní tkáň stejné kvality jako u mladého člověka a podmínky pro implantaci zhoršují. [1]

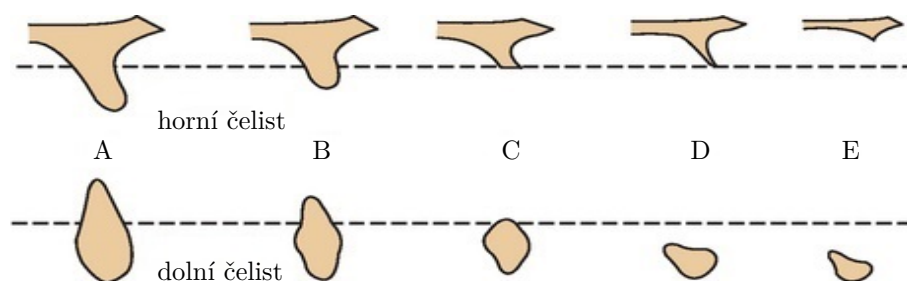
Kvalitativní změny rozdělili do pěti tříd autoři Lekholm a Zarb. Postupná resorpce alveolárního výběžku je na obr. 4.6 Jedná se o tyto stádia [10],[2]:

- Téměř zachovalý alveolární hřeben (A)
- Mírná resorpce alveolu (B)
- Pouze bazální část (C)
- Začátek resorpce bazální části (D)
- Extrémní resorpce bazální části (E)

Jednotlivé oblasti jsou pro implantaci různě využitelné. Obecně se dá říci, že mandibula poskytuje příznivější podmínky k implantacím než maxilla. Příčinou špatných podmínek pro implantaci v maxille je rozšířená čelistní dutina a nižší densita kosti oproti mandibule.[2, 1]



Obr. 4.5: Výskyt různé density v čelisti[1]



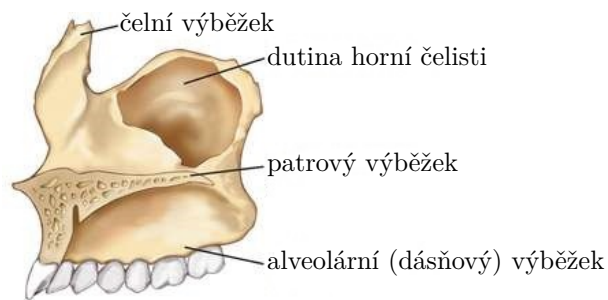
Obr. 4.6: Resorpce bezzubého alveolárního výběžku (Naznačená linie představuje hranici mezi alveolárním výběžkem a bazální částí čelisti.)[22]

### 4.3 Horní čelist – Maxilla

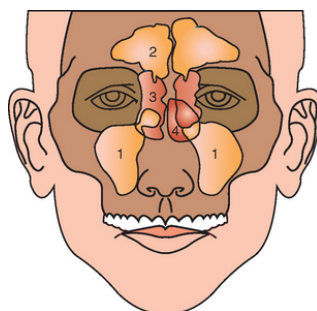
Horní čelist (maxilla) je spolu s chrupem oporou útvaru obličejového skeletu. Tvoří spodinu očníce, z velké části i kostru horních dýchacích cest. Horní čelist bezprostředně ohraničuje dutinu ústní, skládá se z dutého těla, ze kterého vybíhají čtyři výběžky, viz obr.4.7. Specifickou oblastí je zadní část maxilly (posterior maxilla). Oproti přední části maxilly se vyznačuje především nízkou densitou a nedostatečným objemem kosti; působí zde vysoké okluzní síly a oblast může ovlivnit zvětšená dutina horní čelisti. [1, 20]

Součástí horní čelisti je vedlejší dutina horní čelisti (sinus maxillaris). Je největší z vedlejších nosních dutin, s průměrnou kapacitou 25 ml, jak lze vidět na obr.4.8. [20]

Sinus maxillaris prochází vývojem (obr.4.9). Od narození postupně roste do stabilního stádia okolo 20. roku života, kdy jsou prořezány stálé zuby. Velikost vedlejší

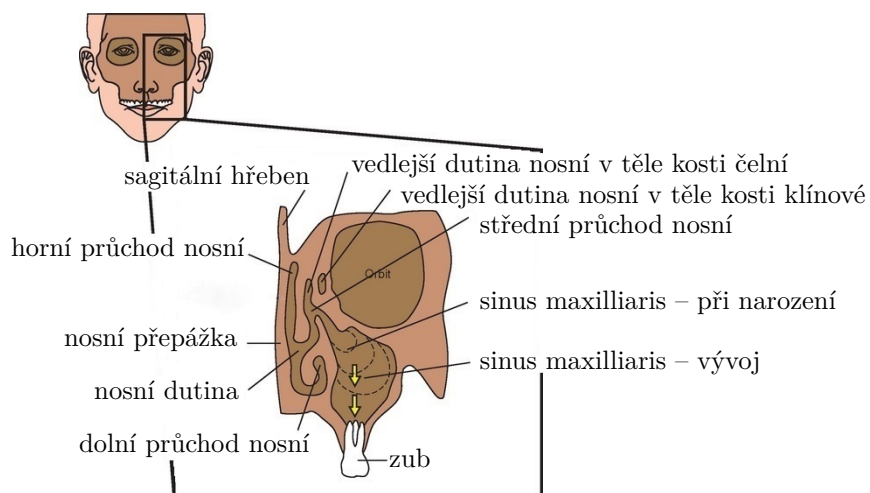


Obr. 4.7: Horní čelist[29]



Obr. 4.8: Vedlejší dutiny nosní: 1 – v horní čelisti, 2 – v čelní kosti, 3 – v čichové kosti, 4 – v kosti klínové [22, 1]

dutiny horní čelisti se však může zvýšit vlivem ztráty okolních zubů. [1]



Obr. 4.9: Vývoj vedlejší dutiny horní čelisti [22, 1]



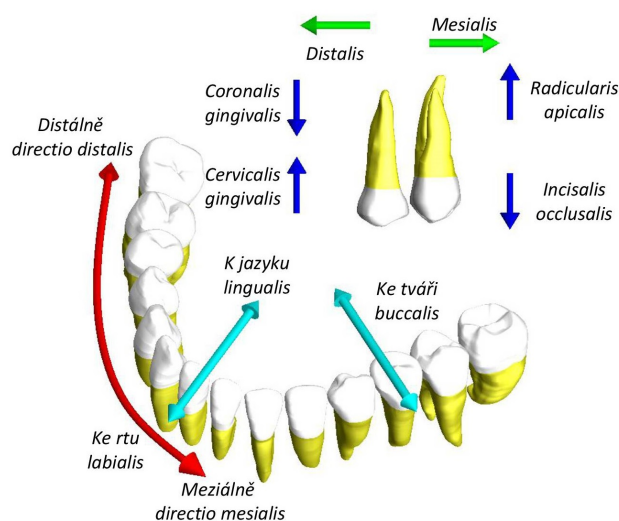
## 4.4 Dolní čelist – Mandibula

Dolní čelist (mandibula) je nejsilnější z obličejových kostí, je spojena s lebkou kloubem. Svojí stavbou je mandibula schopna odolávat značnému funkčnímu zatížení při žvýkání – zuby dolního zubního oblouku drtí potravu proti zubům v horním zubním oblouku. [19]

Dolní čelist se skládá ze zakřiveného těla, které je mohutnější při svém dolním okraji, a dvou ramen. Z hlediska mechanických vlastností je mandibula pevnější než maxilla. [20]

## 4.5 Síly působící při skusu

Při kousání a rozměšňování potravy dochází k mechanickému namáhání soustavy čelist – kost, případně čelist – implantát. Působící síly se pohybují v rozmezí 10-1000 N. Nejvyšší sílu lze vyvinout v oblasti premolárů a molárů, nejnižší v řezácích a špičácích. U mužů obecně je dosahováno vyšších hodnot. Závisí také na směru působení; označování směru ve stomatologii je zobrazeno na obr.4.10. [1, 18]



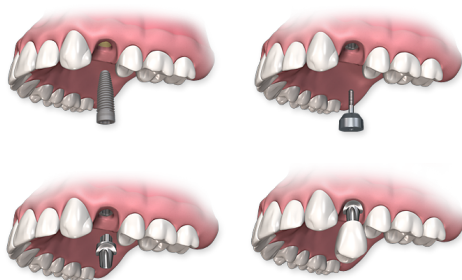
Obr. 4.10: Označení směrů ve stomatologii [1, 8]

## 5 DRUHY IMPLANTÁTŮ

Variant implantátů existuje dnes velké množství a další se vyvíjejí. Mohou být ukotveny v kosti (nitrokostní), v dásni (intramukózní), okostici (subperiostální) nebo jsou uchyceny skrze zub (transdentální). Dále jsou podrobněji popsány běžně používané válcové (šroubové) a čepelkové.

### 5.1 Válcové implantáty

Válcový implantát je rotačně symetrický, má tvar válce. Je-li opatřen zevním závitěm, nazývá se šroubový. Skládá se ze dvou částí: fixtury (nitrokostní část) a abutmentu (intraorální část) a korunky (obr. 5.1). Jeho povrch může být pro lepší oseointegraci speciálně upravován (pískováním, plazmováním). V moderní podobě jej poprvé zavedl v roce 1965 Bränemark. [2]



Obr. 5.1: Válcový implantát [23]

Implantáty lze klasifikovat na základě různých kritérií. Podle průměru lze rozdělit implantáty na [3]

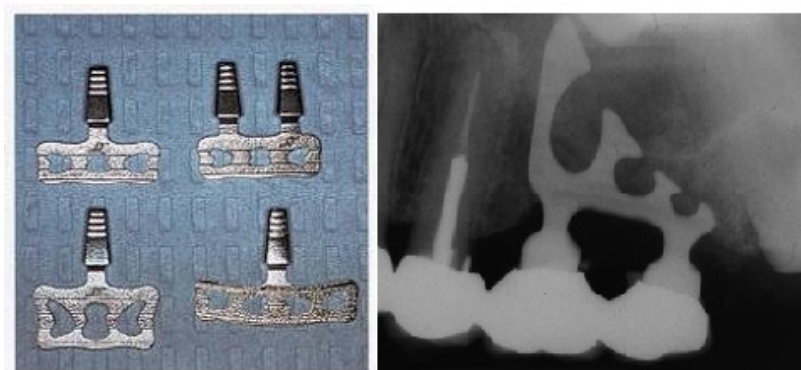
- implantáty se zmenšeným průměrem:  $\leq 3,4$  mm
- implantáty se standardním průměrem: 3,75 mm až 4,0 mm
- implantáty se zvětšeným průměrem:  $\geq 4,5$  mm

Žádoucí je volit optimální průměr implantátu, který závisí především na stavu chrupu, dostupném objemu kosti, typu okluze.

Válcové implantáty se jako jediné používají ve všech indikacích dentálních implantátů. Jsou citlivé na techniku inserce, kvalitu suprakonstrukce a na ústní hygienu. Dlouhodobé výsledky jsou však vynikající, příznivá je i nízká operační zátěž. [2]

## 5.2 Čepelkové implantáty

Název čepelkových implantátů (obr.5.2) je odvozen od jejich tvaru, který připomíná polovinu podélně rozlomené holící čepelky. Využívají se při inzerci do tenkého alveolu (zubního lůžka) díky svému štíhlému klínovitému tvaru. Tělo čepelky je zanořeno v kosti, úzký krček proniká alveolární sliznicí a na pilíř je upevněna suprakonstrukce (vlastní zubní náhrada). Výhodou je nízká cena, související s potřebou menšího počtu implantátů pro náhradu většího počtu zubů a nenáročnost na objem kosti. [2]



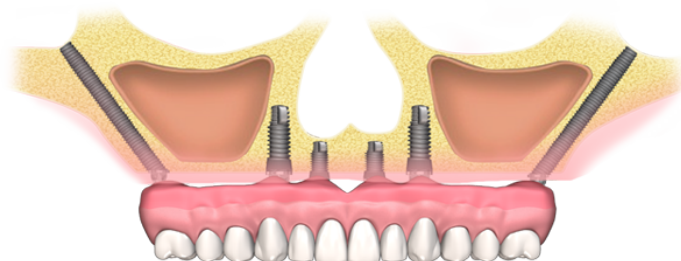
Obr. 5.2: Čepelkový implantát [28, 22]

## 5.3 Další varianty implantátů

Množství jednotlivých typů implantátů je velké a je žádoucí vybrat ten optimální. Není žádoucí popsat zde všechny, pro představu rozdílných tvarů jsou zobrazeny následující tři varianty implantátů: miniimplantáty (obr. 5.3), zygomatické implantáty (obr. 5.4) a diskové implantáty (obr. 5.5).



Obr. 5.3: Miniimplantáty [23]



Obr. 5.4: Zygomatické implantáty [23]



Obr. 5.5: Diskové implantáty [26]

## 6 POSTUP IMPLANTACE

Před samotnou chirurgickou fází implantace je třeba provést důkladné stanovení léčebného plánu.

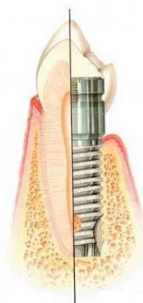
Zjišťuje se anamnéza pacienta, jeho psychologický postoj k zákroku, požadavky na estetické hledisko a další očekávání. Předoperační fáze, na jehož základě se stanoví diagnóza, zahrnuje extraorální vyšetření (například posouzení symetrie obličeje a rtů) a intraorální klinické vyšetření (především velikost a tvar zubů, postavení alveolárních výběžků, kvalita sliznic). Pro upřesnění stavu pacienta se využívá zobrazovacích metod – rentgenologické vyšetření, CT vyšetření pro zjištění objemu a kvality kosti. Je potřeba také zvážit zda je pro daného pacienta zavedení dentálního implantátu vhodným řešením. [2, 3, 9]

### 6.1 Objasnění pojmu oseointegrace

Oseointegraci jako způsob vhojení popsal prvně Bränemark (r.1952). Dále ji experimentálně potvrdil Alberktsson a kol. (r.1981) a vymezil ji jako: „Oseointegrace je přímý kontakt mezi kostí a povrchem implantátu na mikroskopické úrovni.“. Na rozdíl od zubů, vázaných ke kosti pomocí ozubice (periodontia) (obr. 6.1), vytvoření vazivové vrstvy u implantátu je nežádoucí. A to z důvodu vzniku infekce a zánětu kostní tkáně, vedoucí k celkovému selhání implantátu.[2, 7]

Oseointegrace probíhá po první chirurgické fázi po dobu několika měsíců. Vliv na oseointegraci má povrch a tvar implantátu, kvalita kostní tkáně, zatěžování i správná životospráva a hygiena.[7, 4]

Proces vzniku oseointegrace nesmí být narušován mechanickými inzulty. Podle experimentálních prací k oseointegraci nedojde, překročí-li mikropohyb fixtury  $50 - 150\mu m$ . Imobilizaci fixtury a její ochranu před infekcí po dobu vhojování dosáhneme nejlépe dvoudobou dvoufázovou implantací. [2, 1]



Obr. 6.1: Upevnění zubu a implantátu [27]

## 6.2 Chirurgická fáze implantace

Tato kapitola podrobněji popisuje inzerci (zavádění) válcového implantátu, vychází z [2, 3, 13]. Existuje dvoudobá a jednodobá implantace. Při jednodobé se k abutment k fixtuře připojí ihned po implantaci, použití je však výjimečné, například v bradové krajině dolní čelisti. Dvoudobá implantace je lepší z hlediska vhojování implantátu. Skládá se z první a druhé chirurgické fáze a protetické fáze, během které se sejme otisk zubů a zhotoví se zubní náhrada.

### 6.2.1 První fáze implantace

Implantuje se pouze fixtura. Následuje vhojovací období při kterém je stěžejní oseointegrace implantátu. Délka vhojovacího období závisí na denzitě kosti a v horní čelisti (maxille) trvá šest měsíců. Pro porovnání v dolní čelisti probíhá vhojování fixtury (mandibule) tři až čtyři měsíce.

Implantaci rozdělujeme na odloženou a okamžitou. U odložené se inzeruje do plné kosti, tj. do zhojené rány po extrakci zubu. Prosazuje se i okamžitá implantace, kdy je zavedení implantátu provedeno ihned, nebo pár týdnů po ztrátě zubu.

Zásady správné inzerce zahrnuje minimální mechanické a termické poškození stěny kostního lože. Především z hlediska oseointegrace je nežádoucí zahřátí kosti nad teplotu 44° C [2, 3], kterému je možno předejít především snížením počtu otáček vrtáku.

Před samotným zákrokem je pacientovi podáno antibiotikum, ke snížení množství bakterií. Operace se provádí nejčastěji v lokální anestezii. Následují hlavní dílčí úkony:

- preparace lože pro implantát – Lože pro implantát se hloubí postupně několika zaváděcími nástroji. Nejprve vrtákem o průměru 2 mm, rozšiřuje se na 3 mm, poté se provede zahloubení a pokud není implantát samořezný, tak se použije závitník.
- zavedení implantátu – Do připraveného lože se zavede implantát. Je třeba pečlivě dodržet směr zavádění, maximální otáčky a dotáhnout ručně přiměřenou silou.

Implantát se opatří krycím šroubkem. Operační rána se musí důkladně očistit a dásen zašít.

### 6.2.2 Druhá fáze implantace

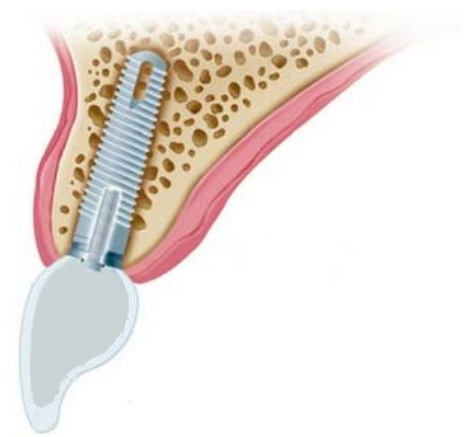
Rentgenologickým vyšetřením se ověří správná oseointegrace. Do vnitřního závitu fixtury je zaveden vhojovací váleček namísto závěrného šroubku. Vhojovací váleček

má za úkol vytvarovat okolní dásně, poté je nahrazen abutmentem a začne se vyrábět suprakonstrukce.

Zkontroluje se úspěšnost implantace. Bolesti v okolí implantátu nebo pohyb implantátu svědčí o neúspěšné oseointegraci. Kontrolu je třeba doplnit i rentgenologickým vyšetřením a ověřením, že nedochází v okolí implantátu ke ztrátě kosti.

## 6.3 Protetická fáze

Jedná se o finální fázi implantace. Zhotoví zubní náhrada, na kterou jsou kladeny jak funkční tak estetické požadavky. Výslednou podobu implantace v horní čelisti lze vidět na obr.6.2.



Obr. 6.2: Provedená implantace v horní čelisti [22]

## 7 PROBLÉMY S IMPLANTACÍ DO HORNÍ ČELISTI

Problémů spojených s implantací zubních náhrad je mnoho. Tato kapitola se zaměřuje na problémy spojené se specifickou anatomií horní čelisti. Faktory ovlivňující úspěšnou implantaci je densita a dostatečný objem alveolární kosti. Ten nemusí být zajištěn z důvodu atrofie kosti, nebo přítomností dutiny nosní a čelistní. Chirurg tak může mít pro implantaci pouze omezenou oblast, jak naznačuje obr.7.1(červená křivka). Šipky zobrazují expandovanou čelistní dutinu.



Obr. 7.1: Expandovaná čelistní dutina (šipky) s naznačenou oblastí vhodnou pro implantaci (červená křivka)[15]

Dílčím problémem je implantace v zadní části horní čelisti (posterior maxilla), na který upozorňuje kap.7.1. Řešením těchto problémů jsou tzv. augmentační (zvětšující) postupy. [1, 2]

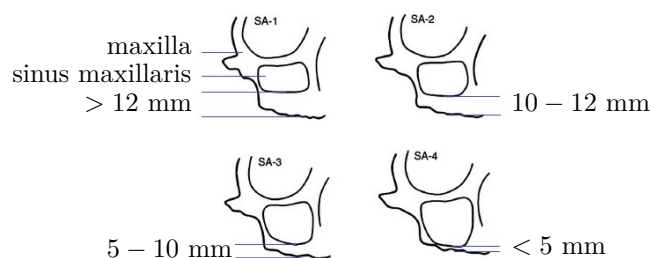
### 7.1 Implantace v zadní části maxilly

Zadní části horní čelisti je běžným místem implantací. Je však spojena s problémy jako je – nedostatečný objem kosti, nízká densita kosti a vysoké okluzní síly. Anatomie zadní části maxilly (kap.4.3) je závislá na velikosti dutiny horní čelisti (maxillary sinus). V roce 1987 rozdělil Misch [1] ošetření zadní části horní čelisti do čtyř kategorií, dle výšky kosti pod dutinou horní čelisti (obr.7.2):

- SA-1 adekvátní výška kosti ( $> 12$  mm)
- SA-2 výška kosti 10 – 12 mm
- SA-3 výška kosti 5 – 10 mm



- SA-4 méně než 5 mm vysoká kost

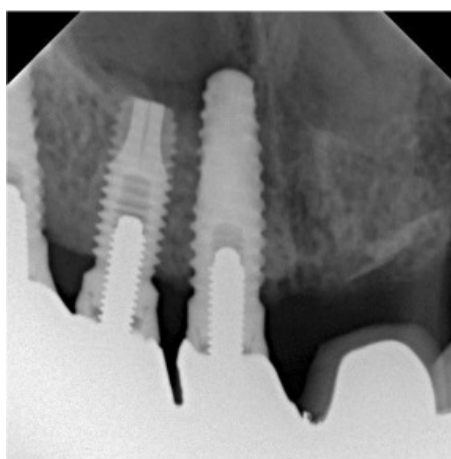


Obr. 7.2: Klasifikace subantrální oblasti (SA) zadní části maxilly dle Mische [22, 1]

Misch dále podrobně specifikuje vhodnou léčbu pro každý z případů. V případě SA-1 je implantace možná i bez předchozí úpravy kosti, může se zvážit její rozšíření. Při SA-2 až SA-4 je vyžadováno chirurgické zvětšení kosti – augmentace. [1, 5]

## 7.2 Implantace v přední části maxilly

Neobvyklý, ale možný případ komplikací při implantaci v přední části maxilly popisuje článek [16]. Patientce byl zaveden dentální implantát v oblasti prvního pravého řezáku. Později pozorovala změnu v proudění vzduchu při dýchání. Bylo zjištěno, že implantát perforoval nosní patro a částečně zasahoval do nosní dutiny (obr.7.3). Léčba spočívala v částečném zkrácení implantátu pod hranici nosní dutiny.



Obr. 7.3: Dentální implantát perforující kortikální kost nosního patra[16]

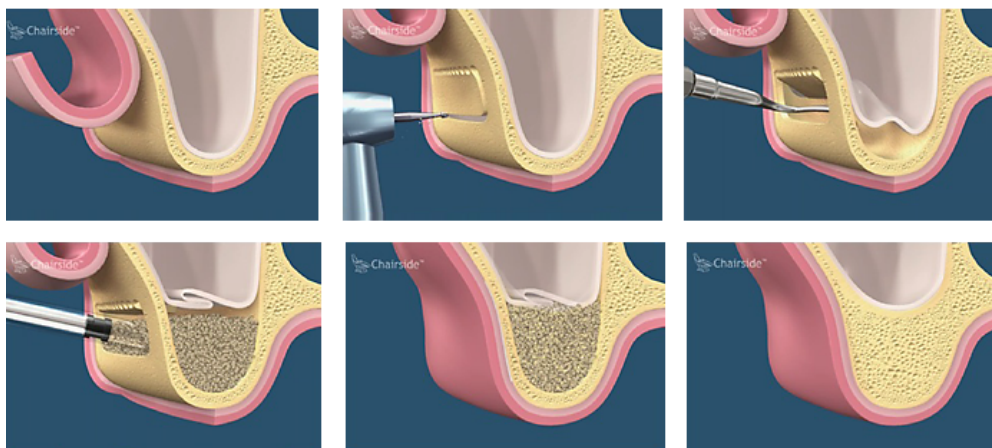
## 7.3 Augmentace

Augmentace je chirurgický zákrok, při kterém se provede zvětšení kosti. Podle rozsahu augmentace se samotná implantace provede ihned nebo až po měsících, nutných ke zhojení oblasti. Augmentace rozšiřuje možnosti dentální implantologie, dovoluje totiž zavádět implantáty i do méně vhodných míst. [1, 2]

### 7.3.1 Varianty augmentačních postupů

Existuje několik augmentačních postupů, pro horní čelist jsou důležité tyto: [2]

- Řízená regenerace kosti – Princip je založen na použití speciální membrány obklopující prostor, kde má být kost regenerována. Pro podpoření stability se do prostoru mezi membránou a kost zavede augmentační materiál, který je nahrazován novotvořenou kostí. Tato metoda se používá při okamžité implantaci, nehodí se jako řešení pro rozsáhle atrofovanou kost. Mezi nevýhody patří dlouhé období novotvorby kosti, cena zákroku a riziko komplikací z předčasné perforace sliznice nad membránou.
- Augmentace volným kostním autotransplantátem – Jde o použití kostního štěpu odebraného z pacienta. Následně se štěp připevní šroubky na požadované místo a následuje období vhojení. Používá se pro rozsáhlejší augmentace kosti.
- Sinus lift (elevace spodiny čelistní dutiny) – Sinus lift spočívá v augmentaci směrem do sinus maxillaris (vedlejší dutiny nosní v horní čelisti). Cílem je vytvořit prostor na spodině čelistní dutiny, který je vyplněn vhodným augmentátem. Jako augmentační materiál se v tom případě používá kostní štěp nebo cizorodý materiál hydroxyapatit, nebo  $\beta$ -trikalciumfosfát. Postup je zobrazen na obr.7.4. Užití metody sinus lift u pacienta s expandovanou čelistí z obr.7.1 lze vidět na obr.7.5.
- Rozšíření kosti (bone spreading) – Řeší případy nekvalitní spongiózní tkáně v horní čelisti. Během tohoto zákroku je kost stlačována a tím zvýšena její denzita. Lze použít i malé množství augmentačního materiálu. V zadní části maxilly lze takto proniknout až do dutiny horní čelisti a tím provést tzv. uzavřený sinus lift.
- Rozštěpení kosti (bone splitting) – Metoda rozštěpení kosti se provádí ve frontální části maxilly. Kost se zde rozštěpí, zavede se fixtura a místo se vyplní augmentačním materiálem. Po překrytí membránou proběhne řízená regenerace tkáně.



Obr. 7.4: Sinus lift – postup augmentace[23]



Obr. 7.5: Šipky naznačující provedení metody sinus lift[15]

### 7.3.2 Augmentační materiály

Nabízí se několik možností augmentačních materiálů jejich volba závisí na místě, rozsahu augmentace a stavu pacienta. V podstatě se nabízí tři hlavní možnosti: [23, 2]

- Vlastní kostní štěp – Odebírá se z pacientovy brady (intraorální), z kyčelní kosti anebo žebra (extraorální).
- Syntetický materiál – Laboratorní výrobek, jde o hydroxyapatit nebo  $\beta$ -trikalciumfosfát. Může se stát součástí nové kosti, nebo rozpustí a podporuje růst nové kosti.
- Cizí kostní štěp – Kostní štěp není přímo od pacienta, kterému je prováděna implantace, ale od jiné osoby, nebo zvířete (krávy).

## 8 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

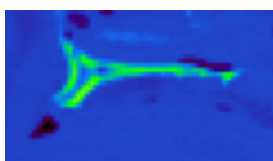
K řešení mechanické interakce mezi prvky se nelze obejít bez experimentálních metod. Efektivní metodou je však i teoretická metoda výpočtového modelování. V biomechanice je nejčastěji využívanou metodou výpočtového modelování metoda konečných prvků (MKP). Pro řešení problémů metodou konečných prvků je využíváno výpočtových systémů, například software ANSYS použitý v této práci.

Výpočtový model se skládá ze čtyř dílčích modelů:

- Model geometrie
- Model materiálu
- Model vazeb
- Model zatížení

### 8.1 Model geometrie

Tvar kosti dolní čelisti byl získán na základě CT snímku lebky, detail na maxillu zobrazuje obr.(8.1). Pomocí příkazu „Spline“ byl v programu Solidworks 2013 vytvořen tvar kortikální a spongiózní kostní tkáně, obr.8.2.

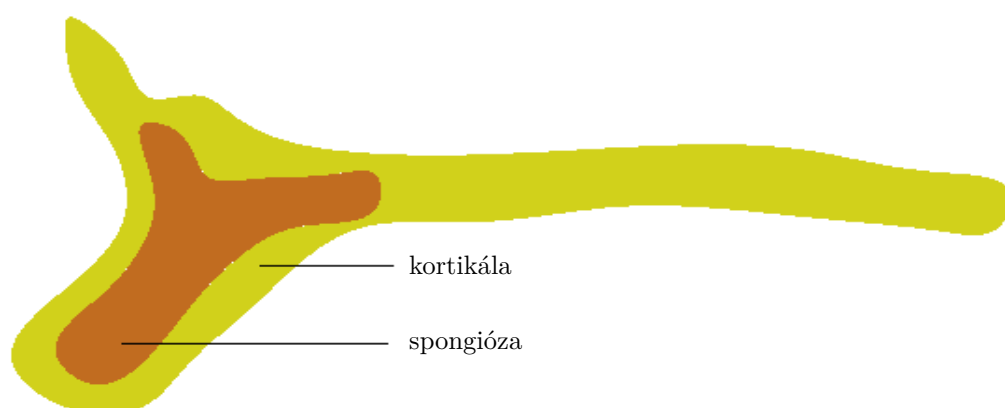


Obr. 8.1: CT snímek, z kterého byl vytvořen model geometrie

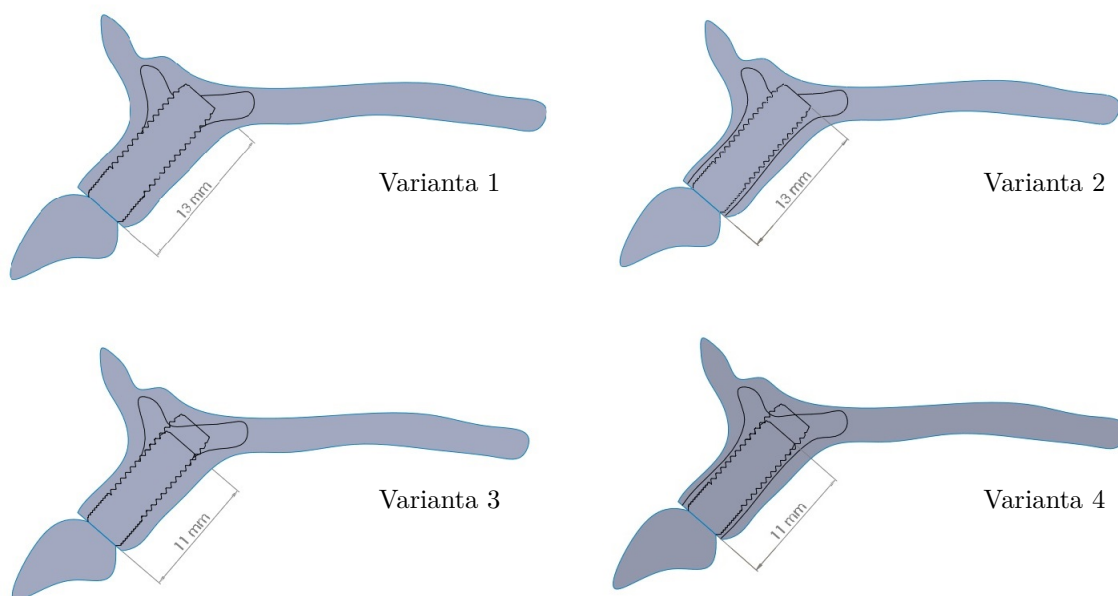
2D model dentálního implantátu (délky 13 mm a průměru 4 mm) byl vytvořen odměřením skutečného implantátu zapůjčeného dr. Wolffem z *VU University Medical Center Amsterdam*. Model implantátu byl vložen do geometrie kostních tkání a byl doplněn o korunku.

Následně byla upravena délka implantátu a velikost spongiózní tkáně a vznikly tím 4 varianty řešení (obr.8.3). Velikosti implantátu byly upraveny tak, aby jednou byl pouze v alveolárním výběžku v kortikální kosti a podruhé je implantát zaveden bikortikálně, tj. ve spodní části. Kortikální tkáň je jednou uvažována v alveolárním výběžku širší, aby docházelo k interakci s implantátem a v další variantě nikoli.

Řešení bylo provedeno programem Ansys Workbench 16.2. Do úlohy Static structural pro 2D objekty byly naimportovány modely geometrie.



Obr. 8.2: 2D Model geometrie kortikální a spongiózní kostní tkáně maxilly

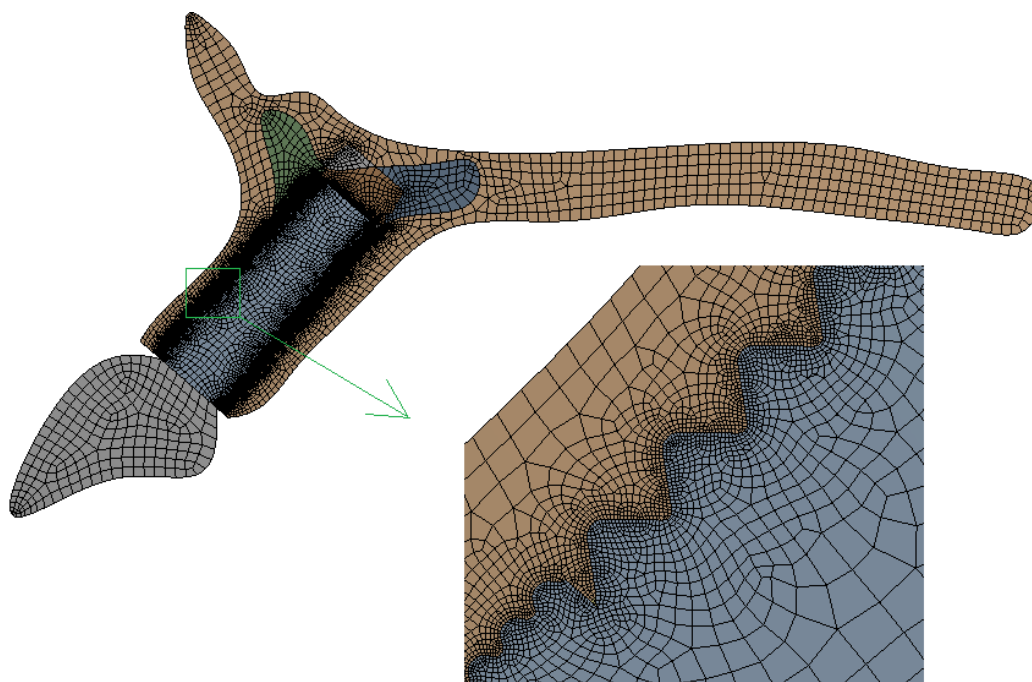


Obr. 8.3: Přehled řešených variant

Následně byla vygenerována síť. Globálně vytvořená síť byla upravena. Síť byla zjemněna v oblastech, kde se závit implantátu dotýká struktury kosti, a to na velikost 0,02 mm. Síť u varianty 3 zobrazuje obr.8.4.

Konečný počet uzlů a prvků se lišil, jak hodnotí tab.8.1.

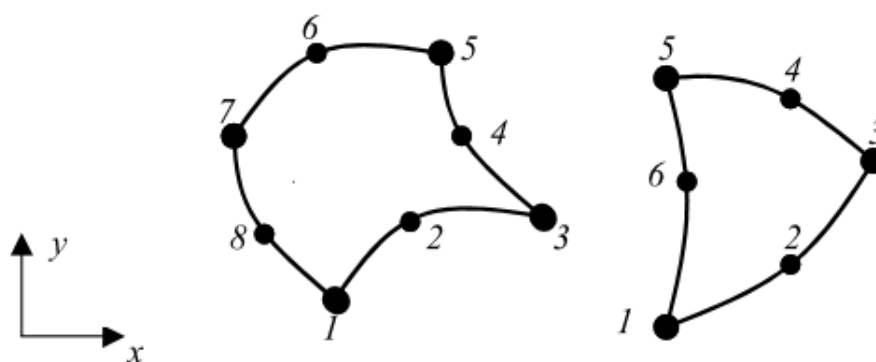
K diskretizaci modelů byly použity rovinné kvadratické prvky s označením PLANE 183. Jedná se o čtyřúhelník s 8 uzly a 2 stupni volnosti a s ním kompatibilní šestiúhelníkový trojúhelník, což je jeho degradovaná podoba a má tedy stejné označení (obr.8.5). [21]



Obr. 8.4: Síť u varianty 3

varianta	počet uzlů	počet prvků
1	85 102	36 542
2	76 574	28 709
3	68 441	21 485
4	36 704	11 431

Tab. 8.1: Přehled počtu uzlů a prvků u jednotlivých variant řešení



Obr. 8.5: Geometrie prvku PLANE 183 [21]

## 8.2 Model materiálu

Model materiálu pro všechny prvky řešené soustavy byl zvolen homogenní lineárně pružný a izotropní (tzv. Hookovský model). Materiál je jednoznačně určen následujícími charakteristikami: Youngovým modulem  $E$  [MPa] a Poissonovým číslem  $\mu$  [–] (viz. tab.8.2).

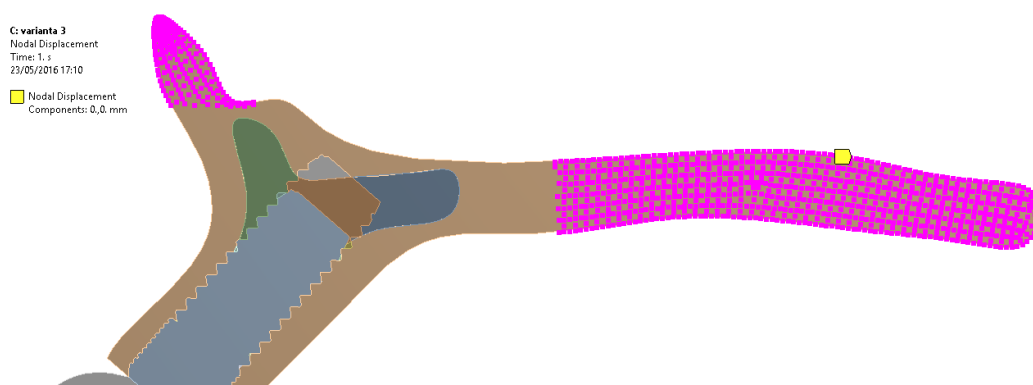
	$E$ [GPa]	$\mu$ [–]
titan	110	0,3
kortikální kost	13,7	0,3
spongiózní kost	0,5	0,3
korunka - keramika	98	0,23

Tab. 8.2: Materiálové charakteristiky - Youngův modul a Poissonovo číslo [4, 14]

## 8.3 Model vazeb

Pro řešení soustavy konečnoprvkovou metodou v programu Ansys je nezbytné ji jednoznačně vymežit v prostoru. To bylo zajištěno pomocí okrajové podmínky *Nodal displacement* aplikované na hranu geometrie kosti (obr.8.6). Jde o posuvnou vazbu aplikovanou na soubor uzlů, zamezující posunům v ose x i y.

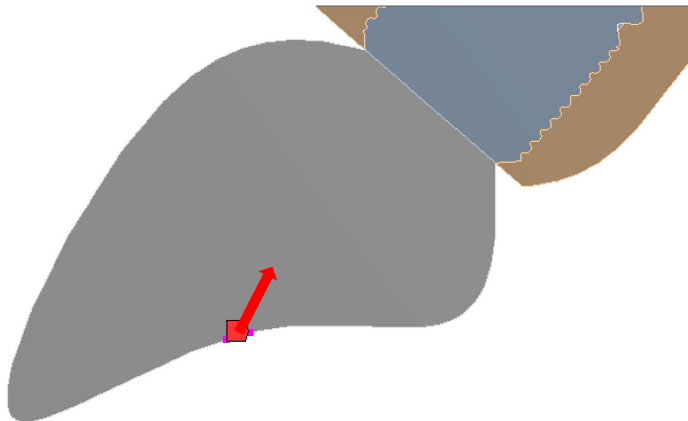
Byl řešen případ s plně oseointegrovaným implantátem. Simulace oseointegrace byla zajištěna společnými uzly mezi kostí a implantátem.



Obr. 8.6: Okrajová podmínka u varianty 3

## 8.4 Model zatížení

Na základě rešerše publikací [17, 18] byla korunka zatížena silou 150 N v koronopikálním směru (obr.8.7).



Obr. 8.7: Aplikace zatížení u varianty 3



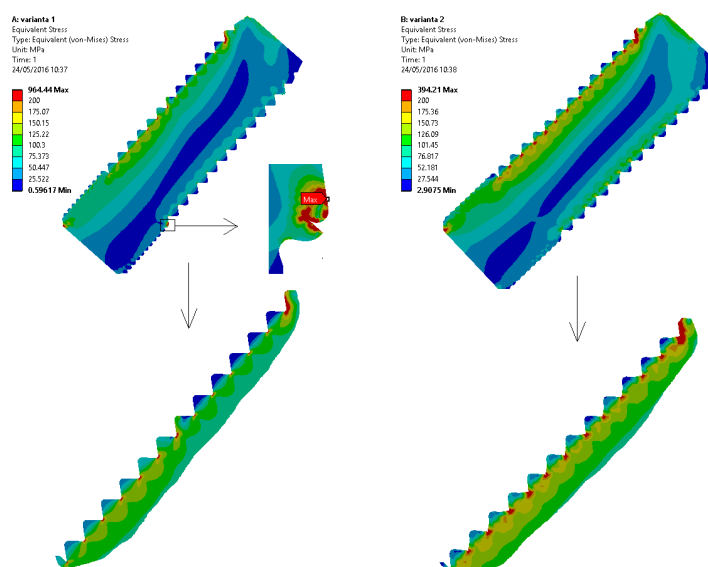
## 9 PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Při prezentaci a následné analýze byla pro každou variantu vyhodnocena redukované napětí podle podmínky HMH (*Equivalent (von-Mises) Stress*), přetvoření (*Equivalent Elastic Strain*) a deformace (*Total Deformation, Directional Deformation*).

### 9.1 Analýza napětí v implantátu

Níže je srovnána situace různé velikosti spongiózní kostní tkáně a to zvlášť u kratšího (11 mm) a delšího implantátu (13 mm).

Na obr.9.1 jsou srovnány hodnoty redukovaného napětí podle HMH [MPa] ve staticky zatížených implantátech variant 1 a 2.

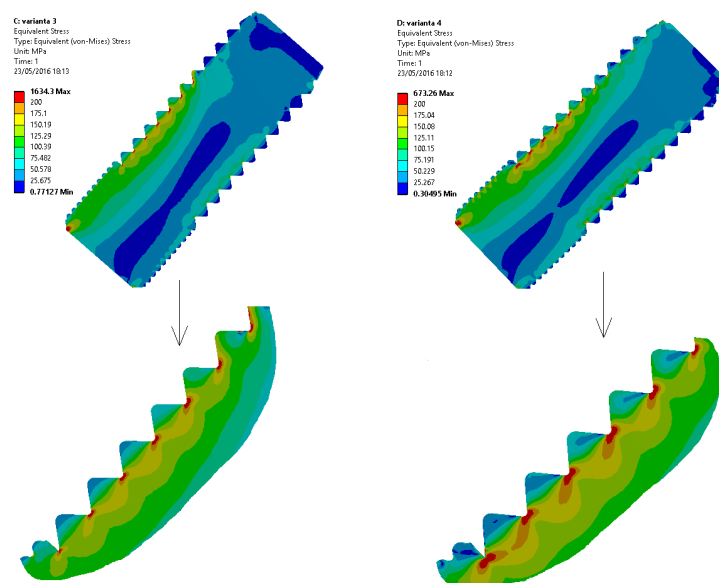


Obr. 9.1: Redukované napětí HMH [MPa] v implantátu - varianta 1 a 2

K maximálním hodnotám napětí dochází v závitech implantátu. Koncentrátorem napětí je i poslední závit.

Na obr.9.2 jsou srovnány hodnoty redukovaného napětí podle HMH [MPa] ve staticky zatížených implantátech variant 3 a 4.

U obou variant dochází k největšímu napětí v závitech implantátu. V místě kde korunka navazuje na implantát, dochází ke koncentraci napětí a napětí zde dosahuje své maximální hodnoty. Je patrné, že u variant, kdy je celý implantát zaveden pouze ve spongiózní kostní tkáni, dosahují hodnoty redukovaného napětí vyšších hodnot než u případů s větší kortikální tkání. Když je implantát delší a zasahuje i v dolní

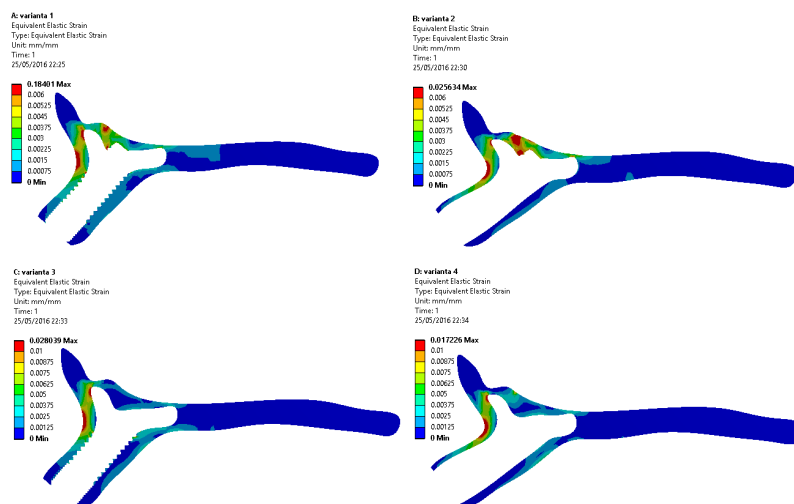


Obr. 9.2: Redukované napětí HMH [MPa] v implantátu - varianta 3 a 4

části do kortikální kosti, jsou vyšší hodnoty napětí ve spodní části implantátu. Naopak u kratšího implantátu jsou vyšší hodnoty napětí v horní části implantátu.

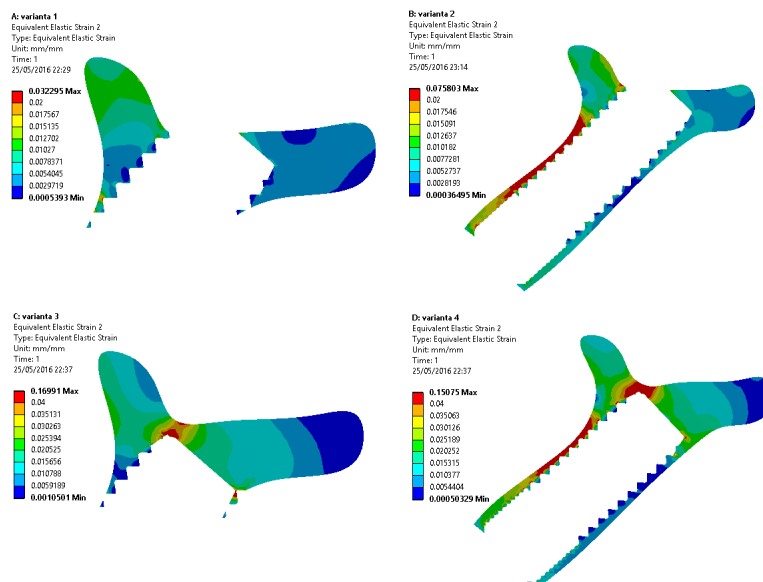
## 9.2 Analýza výsledného přetvoření v kosti

Na obr.9.3 jsou zobrazeny přetvoření v kortikální kosti. Oblasti největšího přetvoření jsou obdobné. U varianty 1 a 2 s delším implantátem dochází k většímu přetvoření.



Obr. 9.3: Přetvoření v kortikální kosti

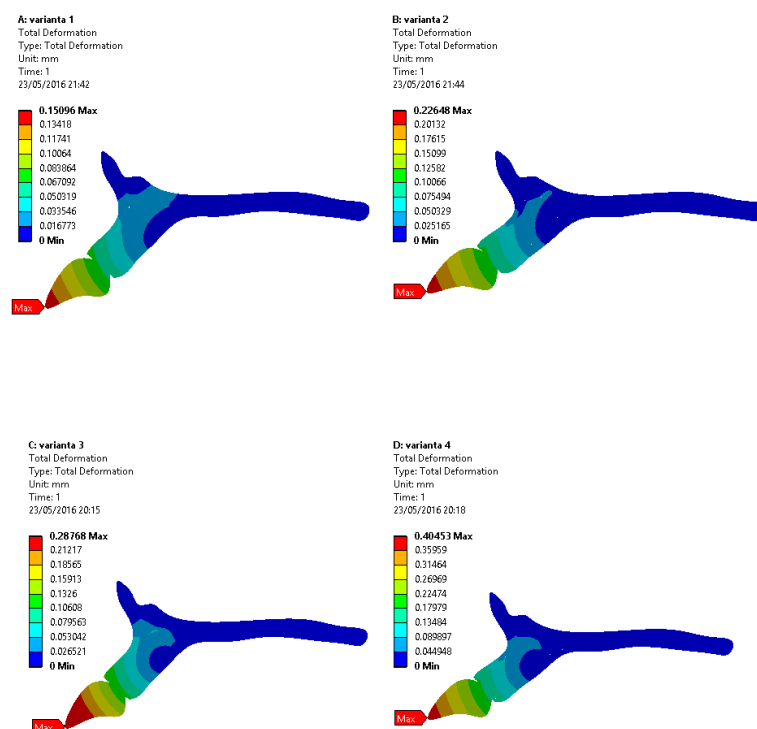
Přetvoření ve spongiózní kostní tkáni (obr.9.4) dosáhují vyšších hodnot u implantátů zavedených bikortikálně (varianta 3 a 4).



Obr. 9.4: Přetvoření v spongiózní kosti

## 9.3 Analýza deformace

Na obr.9.5 jsou vykresleny celkové deformační posuvy. Maximální hodnoty jsou zaznamenány v tab.9.1. Menší deformace nastává jednak u delších implantátů a u implantátů zasazených jak ve spongiózní, tak v kortikální kostní tkáni. Nejlépe z hlediska celkové deformace je na tom tedy varianta 1.

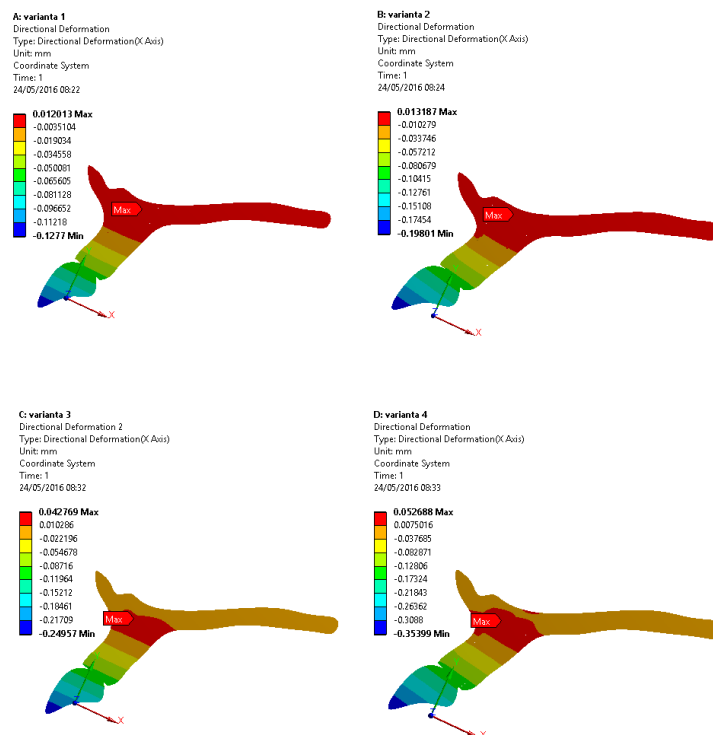


Obr. 9.5: Celková deformace

varianta	celková deformace [mm]
1	0,151
2	0,227
3	0,288
4	0,405

Tab. 9.1: Srovnání celkové deformace

Dále byly analyzovány deformace ve směru x a y lokálního souřadného systému zobrazuje obr.9.6 a obr.9.7. Tento souřadný systém je oproti globálnímu otočen o  $-25^\circ$  okolo osy z. Kladný směr osy y odpovídá směru zatížení implantátu.

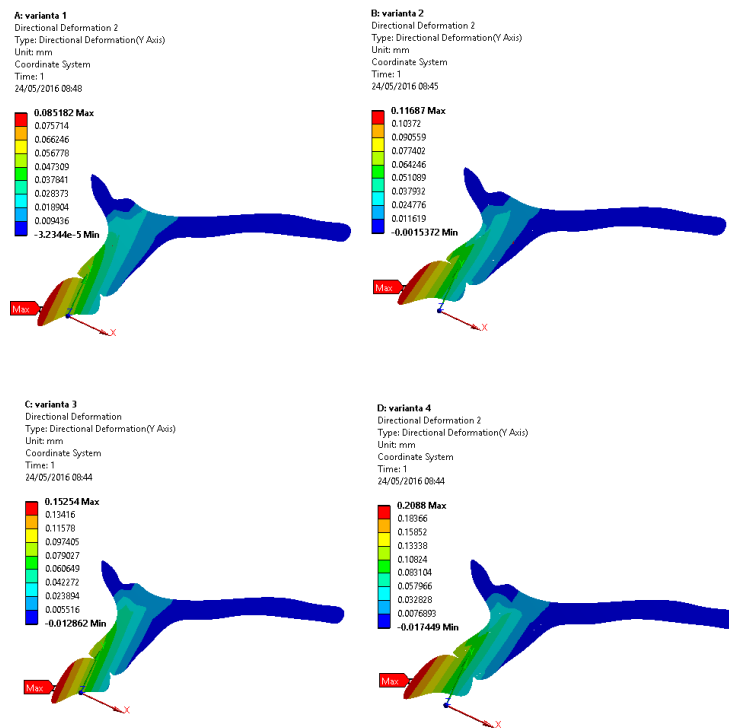


Obr. 9.6: Posuv Ux

Maximální hodnoty posuvů Ux ve směru osy x a Uy ve směru osy y jsou zaznamenány v tab.9.2. Z porovnání posuvů plyne, že když je implantát v interakci s kortikální kostí má nejmenší posuvy. Potvrzuje to varianta 4 u níž jsou posuvy největší, protože implantát je pouze ve spongióze.

varianta	posuv Ux [mm]	posuv Uy [mm]
1	0,012	0,085
2	0,013	0,117
3	0,043	0,153
4	0,053	0,209

Tab. 9.2: Srovnání posuvů Ux, Uy



Obr. 9.7: Posuv Uy

## 10 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešeršní studii publikací týkající se tématu dentální implantologie a to se zaměřením na implantaci v horní čelisti. Oproti dolní čelisti disponuje horní čelist menším objemem kosti, nižší densitou a vyššími okluzními silami. Ve spojení se zvětšenou dutinou horní čelisti se implantace do horní čelisti může zkomplikovat a je vhodné využít augmentace.

Získané informace z rešeršní studie byly použity k následnému provedení deformačně-napěťové analýzy pomocí výpočtového modelování. Byly vytvořeny 4 varianty výpočtových modelů a srovnány byly napětí na implantátech, přetvoření kostní tkáně a posuvy implantátů. Analyzované varianty se lišily velikostí kortikální tkáně v alveolární výběžku a zavedením implantátu jednou do alveolárního výběžku v kortikální kosti a poté bikortikálně.

Záměrem deformačně-napěťové analýzy bylo srovnání napětí v implantátech. Nejvyšší hodnoty redukováného napětí podle podmínky HMM jsou u všech variant v jednotlivých závitech implantátu. Když implantát zasahuje i do dolní části kortikální kosti, jsou vyšší hodnoty napětí ve spodní části implantátu. Naopak u varianty kratšího implantátu je to v jeho horní části.

Hodnoty přetvoření ve spongiózní kostní tkáni dosáhly vyšších hodnot u implantátů zavedených bikortikálně.

Z hlediska analyzované deformace se jeví lépe varianta s větší kortikální kostí a implantáty zavedeny v alveolárním výběžku. Srovnáním posuvů  $U_x$  a  $U_y$  plyne, že implantát zaveden i v kortikální části má nejmenší posuvy.

Cíle bakalářské práce byly splněny.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MISCH, Carl E. *Contemporary implant dentistry*. 3rd ed. St. Louis: Mosby Elsevier, 2008. ISBN 978-0-323-04373-1.
- [2] ŠIMŮNEK, A. *Dentální implantologie*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008, 285 s. ISBN 978-808-7009-307
- [3] DAVARPANAH, M., MARTINEZ H., KEBIR M., TECUCIANU J. *Praktická implantologie*. Praha: Quintessenz, 2005, 220 s. ISBN 80-903-1818-5.
- [4] WOLFF, J., N. NARRA, A. K. ANTALAINEN, J. VALÁŠEK, J. KAISER, G.K. SANDÓN, P. MARCIÁN a Universiteit van Amsterdam. Finite element analysis of bone loss around failing implants. *Materials and Design*. 2014, 61, 177-184. ISSN 02613069.
- [5] MISCH, Carl E. *Dental Implant Prosthetics*. St. Louis: Mosby Elsevier, 2005. ISBN 978-0-323-07845-0.
- [6] NATALI, A. N. *Dental biomechanics*. CRC Press, (2003) ISBN 0415306663
- [7] MAVROGENIS, A.F., DIMITRIOU, R. , PARVIZI, J. a BABIS, G.C. Biology of implant osseointegration. *J Musculoskelet Neuronal Interact*, 9(2) (2009) 61-71. Dostupné z: <http://ismni.org/jmni/pdf/36/01MAVROGENIS.pdf>
- [8] MARCIÁN, P. *Biomechanická studie zubních implantátů pro sníženou hustotu kostní tkáně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 145 s. Vedoucí dizertační práce Ing. Zdeněk Florian, CSc.
- [9] PASLER, F. A., VISSER H. *Stomatologická radiologie*. 1. vyd. Praha: Grada, (2007) ISBN 978-80-247-1307-6.
- [10] SPIEKERMAN, H. *Implantology, Color Atlas of dental medicine*. Thieme, 1995, 388 s. ISBN 978-0865775619.
- [11] ČIHÁK, R., GRIM M. *Anatomie*. 2., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2002, 470 s. ISBN 80-247-0143-X.
- [12] PARK, H. S., LEE, Y. J., JEONG, S. H., KWON, T.G. Density of the alveolar and basal bones of the maxilla and the mandible. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 133 (2008) 30-37.
- [13] LEKHOLM, U., ZARB, G.A.: Patient selection and preparation. In: Brånemark, P-I, Zarb GA, Albrektsson T, editors. Tissue integrated prostheses: osseointegration in clinical dentistry. *Quintessence*, 1 (1985) 199-209.



- [14] CHANG, C., CHEN C., HUANG C. a HSU M. Finite element analysis of the dental implant using a topology optimization method. *Medical Engineering and Physics*, 12 (2002) 657-665.
- [15] ŠIMŮNEK A., KOPECKÁ D., BRÁZDA T., SOMANATHAN R. V. Je laterální sinus lift efektivní a bezpečná metoda? Úvaha po tisíci provedených operací. *Implantologie Journal*, 6 (2007) 34-38.
- [16] WOLFF, Jan, K. KARAGOZOGLU, Jochen BRETSCHNEIDER, Tymour FOROUZANFAR a Engelbert SCHULTEN. Altered nasal airflow: an unusual complication following implant surgery in the anterior maxilla. *International Journal of Implant Dentistry*, 2 (2016) 1-3.
- [17] SAAB, Xavier E., Jason A. GRIGGS, John M. POWERS a Robert L. ENGELMEIER. Effect of abutment angulation on the strain on the bone around an implant in the anterior maxilla: A finite element study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 97(2) (2006) 85-92.
- [18] PETRTÝL M., MÁCA I. *Silové účinky mezi zuby při skusu*, CERM 2008.
- [19] MAZÁNEK, J. a kol. *Zubní lékařství: propedeutika*. 1. vyd. Praha: Grada, 2014, 569 s., ISBN 978-80-247-3534-4.
- [20] KLEPÁČEK, I. a MAZÁNEK J. *Klinická anatomie ve stomatologii*. 1. vyd. Praha: Grada, 2001. ISBN 80-7169-770-2.
- [21] ANSYS Workbench, 16.2, help system, ANSYS, Inc.
- [22] *Pocket Dentistry* [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://pocketdentistry.com/>
- [23] *1888Implant*. [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.1888implant.com/>
- [24] *Medico Dent* [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.medicodent.cz/>
- [25] Dental Implants. *Elizabeth City Dentist, Dr. Robert T. Gillam*. [online]. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.elizabethcitydental.com/dental-implants/>
- [26] *Denta Mechanik* [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.dentamechanik.cz/index.php?lod=0>

- [27] Dental Implants in Poland Treatment. *Dental Travel Poland*. [online].[cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.dentaltravelpoland.co.uk/treatment/implants/>
- [28] Dental implant note on implant madalities with mainstream application. *Dentistry lectures for MFDS/MJDF/NBDE/ORE*. [online].[cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://dentallecnotes.blogspot.cz/2011/07/dental-implant-note-on-implant.html>
- [29] Medical Dictionary. *The Free Dictionary*. [online].[cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/>
- [30] *Zdravotnictví Medicína* [online].[cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://zdravi.e15.cz/archiv/priloha-pacientske-listy/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

D1–D4	klasifikace hustoty kostní tkáně, [-]
MKP	metoda konečných prvků
CT	počítačová tomografie
HU	Hounsfieldovy jednotky (hustota tkání), [-]
F	síla, [N]
SA	subantrální oblast
E	Youngův modul, modul pružnosti, [MPa]
$\mu$	Poissonovo číslo, [-]
HMH	redukované napětí, [MPa]